

ESTUDIO MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL EFECTO DEL ESTADO TENSIONAL INICIAL DEL TERRENO EN LA CARGA DE ROTURA DE UN ENSAYO “TRAPDOOR”

Salvador Senent^{1*} y Rafael Jimenez²

1: Ingeniería y Morfología del Terreno
ETSI de Caminos, CC y PP
Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren s/n. 28040 Madrid. España
e-mail: s.senent@caminos.upm.es

2: Ingeniería y Morfología del Terreno
ETSI de Caminos, CC y PP
Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren s/n. 28040 Madrid. España
e-mail: rjimenez@caminos.upm.es web: <http://geotecnia.camino.upm.es/~jimenez/>

Palabras clave: Trapdoor, Efecto arco, Carga última, Coeficiente de empuje

Resumen Uno de los fenómenos que tiene más relevancia en la estabilidad de excavaciones subterráneas es el denominado efecto arco. Su estudio se puede llevar a cabo mediante el ensayo “trapdoor”, conocido principalmente a partir de su presentación por Terzaghi en la primera ICSMFE en 1936 [1], aunque ya con alguna referencia en el siglo XIX. En este trabajo se lleva a cabo un estudio del ensayo “trapdoor”, mediante modelización numérica, con el objetivo de analizar el efecto que tiene sobre la formación del arco estable el estado tensional inicial del terreno. Para ello se ha realizado un análisis paramétrico con el programa de diferencias finitas FLAC de ITASCA. La modelización numérica posibilita este tipo de estudios al poder fijar y variar cómodamente todos los parámetros que definen el ensayo. Pero, además, permite un exhaustivo seguimiento del proceso de rotura, por lo que se facilita el análisis de los resultados obtenidos. En un ensayo “trapdoor” la carga última es función de la geometría del problema y de las propiedades del material, particularmente de su dilatancia. No obstante, los resultados de este trabajo muestran que el estado tensional del terreno determina, conjuntamente con el resto de parámetros del material, el proceso de rotura. Así, para situaciones con una relación entre la tensión horizontal y vertical superior a 0.5, se forma un primer arco estable de dimensiones reducidas que hace que se presente un mínimo en la carga de rotura, lo cual no ocurre en caso contrario. En consecuencia, se justifica que el estado tensional inicial del terreno incide claramente en la presión necesaria para estabilizar una excavación subterránea.

1. INTRODUCCIÓN

En 1936 Terzaghi presentó, en el primer congreso ICSMFE [1], los resultados de su estudio sobre el ensayo “trapdoor”. En este ensayo se emplea un contenedor, circular o rectangular, que dispone en su base de una trampilla que puede desplazarse de manera independiente. Una vez lleno el contenedor con el material de trabajo, el ensayo consiste en descender la trampilla midiendo la presión que ejerce el material sobre ella, el cual tiende a pasar por la abertura de la base. Como indica Terzaghi [2], *"al movimiento relativo que se produce dentro del suelo se opone una resistencia al corte en la zona de contacto entre las masas que se desplazan y las estacionarias"*. Este fenómeno es el conocido como efecto arco, que puede llegar a permitir la formación de un arco estable que salve la abertura en la base. De manera general, provoca que se reduzca la presión sobre la trampilla y aumente la actuante sobre la base del contenedor que queda fija.

El efecto arco es muy habitual en las obras de ingeniería civil en las que interviene el terreno como elemento resistente. Así, por ejemplo, cuando se estudia la estabilidad de un túnel, la formación o no del arco estable durante el proceso de rotura determina la afección del fallo en superficie.

El ensayo “trapdoor”, como un recurso para el estudio del efecto arco y también por el interés que por sí mismo genera, ha recibido una gran atención por parte de la comunidad investigadora. Partiendo de trabajos anteriores a la presentación de Terzaghi, como los de Engesser [3] y los de Bierbaumer [4], muchos autores han realizado ensayos de laboratorio, en gravedad 1g [e.g. 5] y centrípetos [e.g. 6]. Como describe Tien en [7], se han llevado a cabo estudios teóricos bajo hipótesis elásticas [e.g. 8], plásticas [e.g. 9] o mediante la técnica del análisis límite [e.g. 10]. E igualmente, se han realizado modelizaciones numéricas con modelos continuos [e.g. 11] y, sobretodo en los últimos años, con modelos discretos [e.g. 12].

De manera general estos autores concuerdan en la forma de la curva que liga la presión sobre la trampilla con el desplazamiento de la misma, denominada en lo que sigue curva presión-desplazamiento. Partiendo de la presión geostática, un pequeño desplazamiento de la trampilla supone un importante descenso de la presión. Posteriormente, según continúa el descenso de la trampilla, se produce un aumento de la presión hasta un valor último en el que se estabiliza. En algunos casos, fundamentalmente para materiales sueltos, el valor de la presión cae hasta el valor último sin presentar un mínimo.

La forma de la curva presión-desplazamiento refleja el proceso de rotura que sufre el material. Inicialmente, la rotura se origina en el borde de la trampilla y se propaga hacia el centro del contenedor formándose un primer arco o superficie de rotura. Esta situación se corresponde con el mínimo de la curva presión-desplazamiento. Posteriormente, la superficie de rotura se verticaliza, pudiéndose alcanzar, en función del espesor del material, la superficie del mismo. Como indican entre otros autores Costa et al. [13], esta evolución de la superficie de rotura se debe a que la dilatancia, a la cual se debe ajustarse el mecanismo de rotura para ser cinemáticamente admisible [14], sufre durante el ensayo una reducción hasta un valor residual de la misma forma que, por ejemplo, en un ensayo a corte directo. En muchas

ocasiones la dilatación residual es nula, por lo que al final se obtiene una rotura por planos verticales.

En los trabajos realizados hasta la fecha, se ha prestado mucha atención al efecto de los parámetros resistentes del material en el ensayo, así como a la influencia de las variables geométricas del problema, como el espesor de material o el ancho de la trampilla. Aunque algunos autores han analizado la variación del estado tensional durante el ensayo [e.g. 2], no se ha estudiado en detalle el efecto del estado tensional inicial de la muestra. Esto puede deberse, entre otras razones, a la dificultad de incluir esta variable en los ensayos de laboratorio o quizás, a la asunción, suponiendo un comportamiento asociado del material, de que el estado tensional no influye en el resultado. Por lo tanto, con el objetivo de ahondar en el conocimiento del efecto arco, en este trabajo se aborda, mediante modelización numérica, el estudio de la influencia de estado tensional inicial en el ensayo "trapdoor".

2. MODELO NUMÉRICO

Para el estudio del efecto del estado tensional inicial se ha empleado un modelo de diferencias finitas en deformaciones planas, construido con el programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) de Itasca Consulting Group [15]. El modelo, que se muestra en la Figura 1, simula una sección transversal de un contenedor rectangular de longitud infinita. El ancho del contenedor es de 50 cm y el de la trampilla 10 cm, siendo el espesor del material 20 cm. Se ha aprovechado la simetría del problema, por lo que el modelo tiene unas dimensiones en alzado de 25 por 20 cm². El ancho de elemento en la zona sobre la trampilla es de 2 mm, ampliándose según se aleja de esa zona y constituyéndose el modelo por un total de 6200 elementos. Como condiciones de contorno, aparte de la simetría, se han fijado los desplazamientos verticales en la base y los horizontales en la pared del contenedor.

Se ha considerado un modelo constitutivo elástico perfectamente plástico, basado en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, el cual se encuentra implementado en FLAC. Como parámetros elásticos se ha tomado un módulo de Young de 6 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.30. La densidad del material se ha fijado en 1.6 t/m³. Se ha supuesto un ángulo de rozamiento de 40° y una cohesión nula. Se ha considerado tanto un comportamiento asociado del material, con una dilatación igual al ángulo de rozamiento, como un comportamiento no asociado, con dilatación nula.

Al igual que con muchos otros problemas de carga de rotura, la modelización, mediante elementos finitos o diferencias finitas, del ensayo "trapdoor" exige decidir el tipo de control del proceso. Se suele hablar de un control de la modelización por carga o por desplazamiento. Cuando se hace un control por carga se reduce progresivamente la presión aplicada en el material situado sobre la trampilla hasta que se produce su colapso. Este planteamiento suele ser más costoso en tiempo de cálculo y puede, en algunos casos [11], producir errores en las estimaciones. Por lo tanto, suele emplearse un control por desplazamiento en el que se deforma el material hasta que se alcanza la rotura. No obstante, ambos métodos adolecen de la misma limitación, puesto que es necesario realizar alguna suposición sobre el comportamiento del material, ya sea en su distribución de deformaciones sobre la trampilla o en la distribución de la presión que la trampilla ejerce sobre el material. A raíz de estos inconvenientes, en este

trabajo se ha incluido en el modelo la propia trampilla, la cual se hace descender durante la realización del ensayo. De esta forma es el material, al deformarse y apoyarse en ella, el que genera la presión sobre sí mismo. Este planteamiento no es habitual y exige modelizar el contacto material-trampilla y definir correctamente la forma de cálculo del modelo.

En FLAC se hace necesario disponer una interfase en el contacto entre la trampilla y el material del contenedor, puesto que no existe una unión perfecta entre ambos materiales, sino que pueden deslizarse entre ellos e incluso separarse. Las interfases en FLAC trabajan bajo la hipótesis de un contacto friccional de tipo Columbiano y vienen definidas, fundamentalmente, por las siguientes propiedades: rigidez normal (k_{n-int}), rigidez transversal (k_{s-int}), cohesión (c_{int}) y ángulo de rozamiento (ϕ_{int}). Los valores empleados en el modelo: $k_{n-int} = 1.0$ MPa, $k_{s-int} = 1.0$ MPa, $c_{int} = 0.0$, $\phi_{int} = 0.0$ reproducen una trampilla lisa que no coacciona el movimiento del material.

El procedimiento de trabajo habitual en FLAC es construir el modelo y calcular hasta su estabilización. Ésta se alcanza cuando se supera alguno de los límites establecidos; por defecto, cuando el ratio de la fuerza desequilibrada cae por debajo de 10^{-3} . Si el problema fuese inestable, el cálculo continuaría indefinidamente, pero con la posibilidad de registrar todo el proceso seguido. No es posible seguir este planteamiento en nuestro modelo, debido a que la trampilla constituye una condición de contorno variable durante el propio cálculo. Sería necesario imponer un desplazamiento infinitesimal de la trampilla y calcular hasta estabilización, repitiendo este bucle hasta alcanzar el desplazamiento total. Debido a la gran exigencia de tiempo que ello supondría se ha decidido fijar para la trampilla una velocidad constante, finalmente $2.0E-6$ m/s (metros por paso de cálculo), suficientemente baja para que no se altere la forma de la curva presión-desplazamiento.

A partir de este planteamiento se han incorporado en el modelo las siguientes fases de cálculo:

- (i) Asentamiento del material e inicialización de tensiones. Mediante una función en FISH (el lenguaje de programación propio de FLAC), se inicializa el estado tensional en el material. Para ello se calcula la carga de tierras sobre cada elemento, obteniéndose la tensión vertical, y se determina la tensión horizontal como la tensión vertical multiplicada por un factor K (coeficiente de empuje). Fijados los desplazamientos horizontales en toda la base, incluida la trampilla, se calcula el modelo hasta su estabilización. En esta fase, debido a que se inicializa un estado tensional que no provoca plastificaciones y que se encuentra en equilibrio, la estabilización es casi automática.
- (ii) Colocación de la trampilla. En esta fase se liberan los desplazamientos verticales en la parte de la base correspondiente a la trampilla y se activan los elementos que constituyen ésta así como la interfase. Calculando nuevamente hasta equilibrio, se generan las tensiones normales en la interfase correspondientes al peso del material del contenedor.
- (iii) Descenso de la trampilla. Esta fase corresponde con el ensayo propiamente dicho. Para ello se hace descender la trampilla a velocidad constante, midiendo la presión que el material ejerce sobre la misma.

Partiendo de las variables definidas anteriormente, relativas a la geometría del problema, a las propiedades de los materiales y las internas del cálculo, para el análisis del estado tensional inicial se han supuesto diferentes valores de K (0.2, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0.) y se han comparado los resultados obtenidos en los modelos según se describe en el siguiente apartado.

3. RESULTADOS

Los principales resultados del modelo y sobre los que se centra el análisis son: la curva presión-desplazamiento y la evolución de la superficie de rotura, obtenida ésta a partir de la distribución de las deformaciones por cortante. En primer lugar se muestran los resultados correspondientes a los modelos en los que se supone un comportamiento asociado del material y posteriormente los resultados de los modelos con un comportamiento no asociado y dilatación nula.

3.1. Modelos con flujo asociado

En la Figura 2 se muestran las curvas presión-desplazamiento para los diferentes valores de K , suponiendo en todos los casos una ley de flujo asociada. Todas las curvas presentan un descenso brusco de la presión sobre la trampilla en cuanto se inicia el descenso de la misma. La presión se reduce entre un 85 y 65 % para un desplazamiento en el entorno del 0.05 %. A este descenso brusco le sigue una variación suave que hace converger las diferentes curvas. Cuanto mayor es el valor de K , el punto de inflexión de la curva presión-desplazamiento se produce a una presión mayor, siendo la convergencia posterior más acentuada. Puesto que se supone una ley de flujo asociada, y teniendo en cuenta que el material es elástico perfectamente plástico, es posible analizar el problema mediante la técnica del análisis límite. Para ello se emplea un mecanismo de rotura, ya empleado por otros autores [e.g. 9], de forma triangular con una abertura en su vértice superior igual al doble del ángulo de rozamiento (40°). De esta forma el mecanismo es cinemáticamente admisible y válido para su empleo como solución de contorno superior. En la Figura 2 se incluye el resultado obtenido a partir de este mecanismo (una presión última sobre la trampilla del 14 % de la presión geostática), el cual concuerda notablemente bien con la modelización numérica.

Como se ha indicado, la visualización de la superficie de rotura se realiza a partir de la distribución de las deformaciones por cortante. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se muestra la superficie de rotura cuando se ha alcanzado una deformación de 0.5 % en el caso de K igual a 0.2. La orientación de la rotura concuerda muy bien con la dada por la solución del análisis límite, con la diferencia de que en la parte superior se curva.

El análisis de la evolución de la superficie de rotura en cada ensayo muestra una clara diferencia en el comportamiento en función del factor K . En los casos con K igual a 2.0, 1.5 y 1.0 la rotura parte del borde de la trampilla y se propaga hacia el eje del contenedor. A modo de guía en la Figura 4 se muestra la evolución de las deformaciones por cortante en función del desplazamiento de la trampilla para el caso con K igual a 2.0. La inclinación de la rotura inicial es menor cuanto mayor es el valor de K y siempre menor que la dada por la solución del análisis límite. Cuando la rotura alcanza el eje de simetría, se produce el punto de inflexión en la curva presión-desplazamiento. A partir de ese momento, y coincidiendo con el

proceso de convergencia que se produce en la curva presión-desplazamiento, la superficie de rotura aumenta progresivamente su inclinación y se aproxima cada vez más a la solución dada por el análisis límite.

En los cálculos con K igual a 0.5 y 0.2, la rotura también se origina en el borde de la trampilla pero se propaga hacia las paredes del contenedor. Como ejemplo, en la Figura 5 se muestra la evolución de las deformaciones por cortante para el modelo con K igual a 0.2. Para estos casos, la superficie de rotura sufre un giro anti-horario, con un salto brusco una vez alcanzada la vertical. Cuando la superficie de rotura toca el eje de simetría del modelo se produce el punto de inflexión en la curva presión-desplazamiento. Esta primera superficie de rotura prácticamente coincide con la solución dada por el análisis límite, sin que varíe sustancialmente durante el resto del ensayo.

Este primer análisis se puede considerar bastante “irreal”, no sólo por suponer un flujo asociado (el ángulo de dilatación tiende a ser inferior al ángulo de rozamiento [16]), sino por emplear unas propiedades del material constantes durante todo el ensayo. Al igual que en otros ensayos existirá una degradación de las propiedades, fundamentalmente fricción y dilatación, que aquí no se ha implementado. No obstante, en primer lugar facilita el contraste de los resultados con una solución teórica, el análisis límite, lo cual permite verificar la modelización; y en segundo lugar, muestra una diferencia en el comportamiento en función del factor K que se considera trasladable a otra modelización más “real”. Esta diferencia se produce desde inicio del ensayo, con deformaciones pequeñas, por lo que las propiedades no habrán variado significativamente. Como se expone a continuación, esta diferencia tiene una clara repercusión en el caso “más real” no asociado con dilatación nula.

3.2. Modelos con flujo no asociado y dilatación nula

Al igual que en el sub-apartado anterior, se presenta en primer lugar las curvas presión-desplazamiento para los diferentes valores de K (Figura 6). Del mismo modo que en el caso asociado, todas las curvas presentan una notable reducción de la presión para un desplazamiento reducido. Sin embargo, su comportamiento, a medida que se produce la rotura, difiere claramente. En los casos con K igual a 0.2 y 0.5, la curva converge rápidamente a un valor último de la presión en el entorno del 35 %, muy superior al mostrado en el caso asociado (14 %). La curva para K igual a 1.0 presenta un mínimo en el entorno del 20 %, incrementándose posteriormente hasta un valor último del 28 %. Finalmente, en las curvas para K igual a 1.5 y 2.0 también aparece un mínimo en el entorno del 20 %, pero siendo el valor último muy similar. Para estos casos, con flujo no asociado, no existe una solución teórica con la que contrastar los resultados obtenidos.

El análisis de la evolución de la superficie de rotura vuelve a arrojar luz sobre estos resultados. Empezando por el caso de K igual a 1.0 (Figura 7), la rotura se origina en el borde de la trampilla y forma un primer mecanismo de rotura con una inclinación similar a la solución dada por el análisis límite para el caso asociado y que se corresponde con el mínimo de la curva presión-desplazamiento. Sin embargo, al continuar el descenso de la trampilla, se produce una verticalización de la superficie, alcanzándose finalmente una rotura por planos verticales. Este proceso se parece al comentado en el primer apartado y provoca que la curva

tenga un aspecto similar al obtenido en los ensayos de laboratorio, con un valor mínimo y un valor último claramente diferenciados. Se debe señalar que la justificación habitual para este fenómeno recae en la reducción del valor de la dilatancia que se produce durante el ensayo. No obstante, en el modelo empleado la dilatancia es nula pero constante a lo largo de todo el ensayo, por lo que no sería posible la primera superficie de rotura. Algunos autores, como [12], han relacionado el mínimo de la curva presión-desplazamiento con el ángulo de rozamiento pico (en lugar de con el ángulo de dilatancia pico), lo cual ajustaría mejor con el resultado obtenido aquí. En los casos con K igual a 1.5 y 2.0 el comportamiento esperable sería similar al de K igual a 1.0 y, a efectos de la superficie de rotura, así ocurre (Figura 8). Partiendo de una superficie con una inclinación menor, se produce la evolución hasta la rotura por planos verticales. De los resultados de la curva presión-desplazamiento se desprende que existe una influencia del estado tensional inicial en el valor de la presión última.

Finalmente, en los casos con K igual a 0.2 y 0.5 (la Figura 9 muestra la evolución de la superficie de rotura para K igual a 0.2), la rotura se propaga inicialmente hacia las paredes del contenedor y posteriormente rota en sentido anti-horario, de igual forma a como ocurría en el caso asociado. Sin embargo, para los modelos no asociados, la evolución se detiene cuando se produce una rotura por planos verticales, la cual queda constante durante el resto del ensayo. Así, el fenómeno se interrumpe al encontrarse en su evolución con la solución definitiva, o mejor dicho, con una solución posible, puesto que al ser la dilatancia nula el mecanismo cinemáticamente admisible es el de paredes verticales. Esto justifica porque la curva presión-desplazamiento no presenta un mínimo, sino que el valor de la carga decrece directamente hasta su valor final.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la influencia del estado tensional inicial en un ensayo “trapdoor”. Para ello se ha empleado un modelo numérico en deformaciones planas, construido con el programa FLAC. Los diferentes estados tensionales se han definido a partir del factor K , que liga las tensiones horizontales con las tensiones verticales en la fase inicial del cálculo.

Los modelos construidos han mostrado el efecto de factor K en el proceso de rotura del material. Para valores de K por encima de 0.5 el proceso de rotura es el habitualmente reconocido en este tipo de ensayos: la rotura parte del borde de la trampilla y se propaga hacia el eje del contenedor; una vez ocurrida la primera superficie de rotura, ésta evoluciona en función del valor de la dilatancia, de tal forma que el mecanismo final sea cinemáticamente admisible. Para valores de K por debajo de 0.5 la rotura crece inicialmente hacia las paredes del contenedor y luego rota en sentido anti-horario hasta que, igualmente, el mecanismo final sea cinemáticamente admisible en función del valor de la dilatancia.

Este fenómeno se refleja en la curva que relaciona la presión sobre la trampilla con el desplazamiento de la misma. En el caso de un material con flujo no asociado, lo cual se aproxima más a la realidad, valores de K por encima de 0.5 determinan que la curva presente un mínimo al poco de iniciarse el descenso de la trampilla, coincidiendo con la primera superficie de rotura, para luego ascender hasta un valor último. Para valores de K por debajo

de 0.5 la curva desciende hasta el valor último pero sin presentar ningún mínimo. Esto coincide con los resultados obtenidos por algunos autores [e.g. 2] al comparar ensayos con materiales densos y sueltos. Aunque es posible enlazar los dos puntos de vista, puesto que para situaciones con una mayor K es esperable una mayor compactación del material, no se había ligado hasta ahora el proceso de rotura con el estado tensional inicial en el terreno. Los resultados obtenidos justifican el efecto del estado tensional inicial en la presión necesaria para estabilizar una excavación subterránea. Su valor sería igual al mínimo de la curva presión-desplazamiento, dependiente del factor K, puesto que al aplicar esa presión se detendría el proceso de rotura y no se alcanzaría la presión última.

REFERENCIAS

- [1] K. Terzaghi. *Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trapdoor*. Proceedings of International Conference of Soil Mechanics, Harvard University, Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311 (1936).
- [2] K. Terzaghi. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York (1943).
- [3] F. Engesser. *Ueber den Erddruck gegen innere Stützwände (Tunnelwände)*. Deutsche Bauzeitung, Vol. 16, pp. 91-93 (1982).
- [4] A. Bierbaumer. *Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerks*, Engelmann, Leipzig (1913).
- [5] T. Tanaka and T. Sakai. *Progressive failure and scale effect of trap-door problems with granular materials*. Soils Found, Vol. 33(1), pp. 11-22 (1993).
- [6] G. Iglesia, H. Einstein and R. Whitman, R. *Validation of Centrifuge Model Scaling for Soil Systems via Trapdoor Tests*. J Geotech Geoenviron Eng, Vol. 137(11), pp. 1075-1089 (2011).
- [7] H. Tien. *A Literature Study of the Arching Effect*. M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1996).
- [8] W.D.L. Finn. *Boundary Value Problems of Soil Mechanics*. J Soil Mech And Found Div, ASCE, Vol. 89(SM5), pp. 39-72 (1963).
- [9] C.H. Evans. *An Examination of Arching in Granular Soils*. M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1984).
- [10] C.C. Smith. *Limit loads for an anchor/trapdoor embedded in an associative coulomb soil*. Int J Numer Anal Meth Geomech, Vol. 22(11), pp. 855-865 (1998).
- [11] R.D. Borst and P.A. Vermeer. *Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis*. Geotechnique, Vol. 34, pp. 199-210 (1984).
- [12] B. Chevalier, G. Combe and P. Villard. *Experimental and numerical study of the response of granular layer in the trap-door problem*. Proceedings of the 6th international conference on micromechanical of granular media, Golden, Colorado (2009).
- [13] Y.D. Costa, J.G. Zornberg, B.S. Bueno and C.L. Costa. *Failure Mechanisms in Sand over a Deep Active Trapdoor*. J Geotech Geoenviron Eng, Vol. 135(11), pp. 1741-53 (2009).
- [14] K.J.L. Stone and D.M. Wood. *Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand*. Soils Found, Vol. 32(4), pp. 43-57 (1992).
- [15] Itasca Consulting Group Inc. *FLAC Manual, sixth ed. (FLAC Version 6.0)*. Minneapolis, Minnesota (2008).
- [16] L.R. Alejano and E. Alonso. *Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses*. Int J Rock Mech Min Sci, Vol. 42, pp. 481-507 (2005).

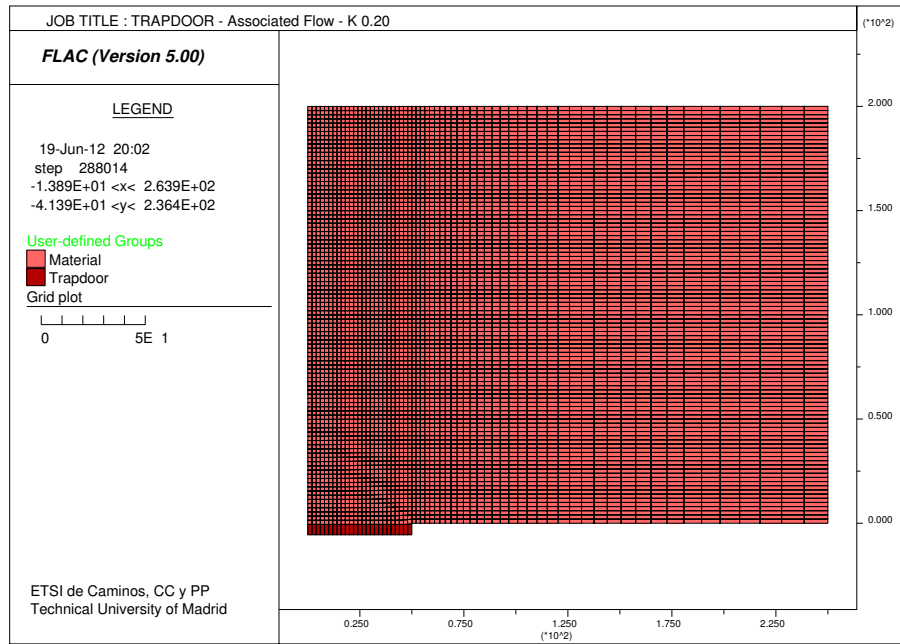


Figura 1. Modelo de cálculo.

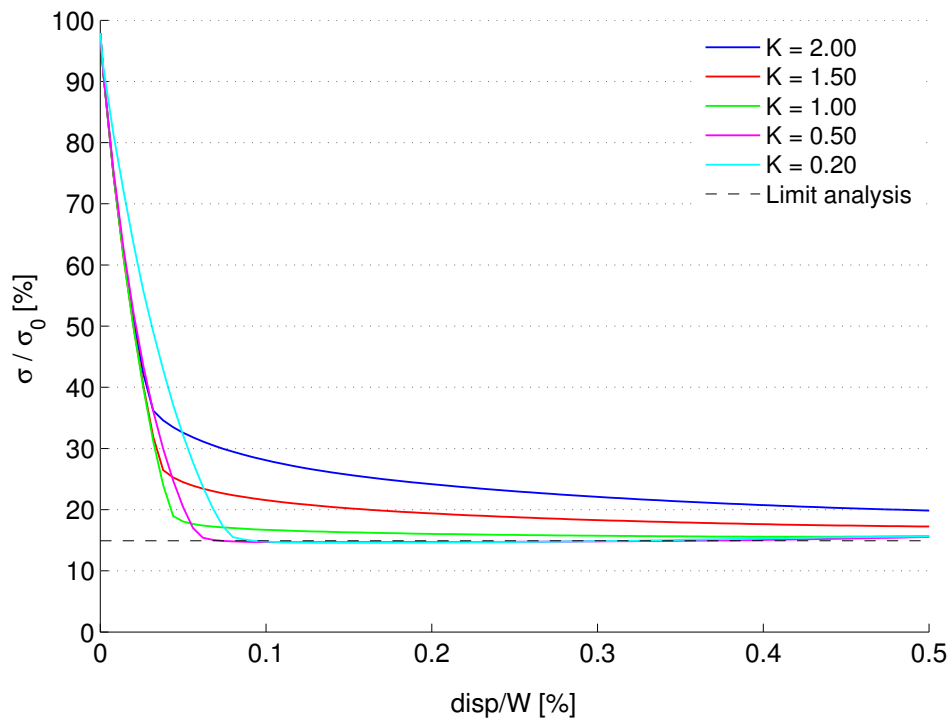


Figura 2. Curvas presión-desplazamiento para modelos con flujo asociado.

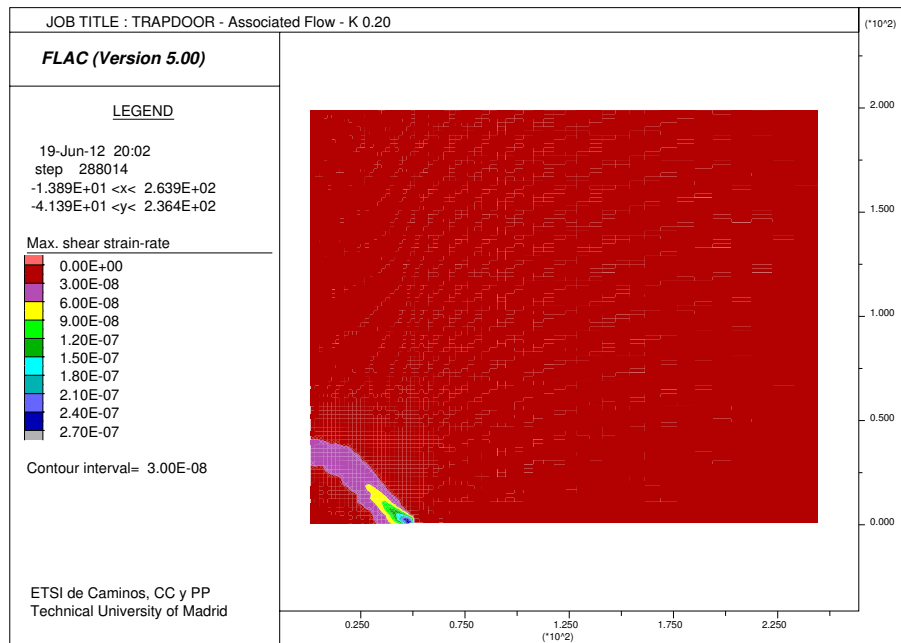


Figura 3. Visualización de la superficie de rotura mediante las deformaciones por cortante.

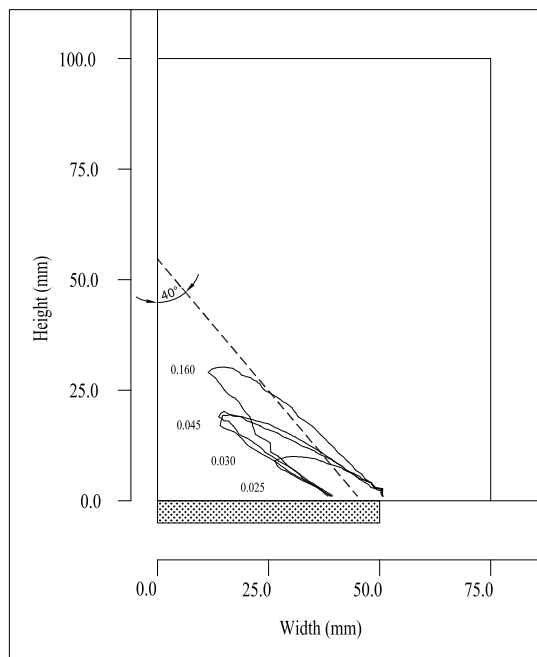


Figura 4. Evolución de la rotura para K igual a 2.0 y flujo asociado.

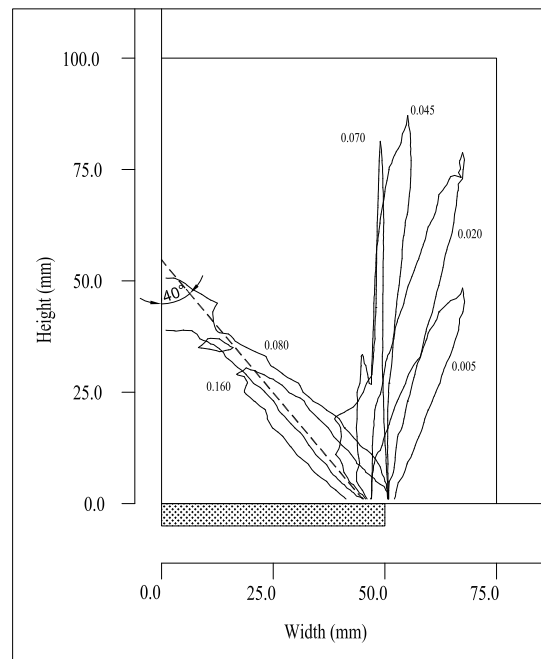


Figura 5. Evolución de la rotura para K igual a 0.2 y flujo asociado.

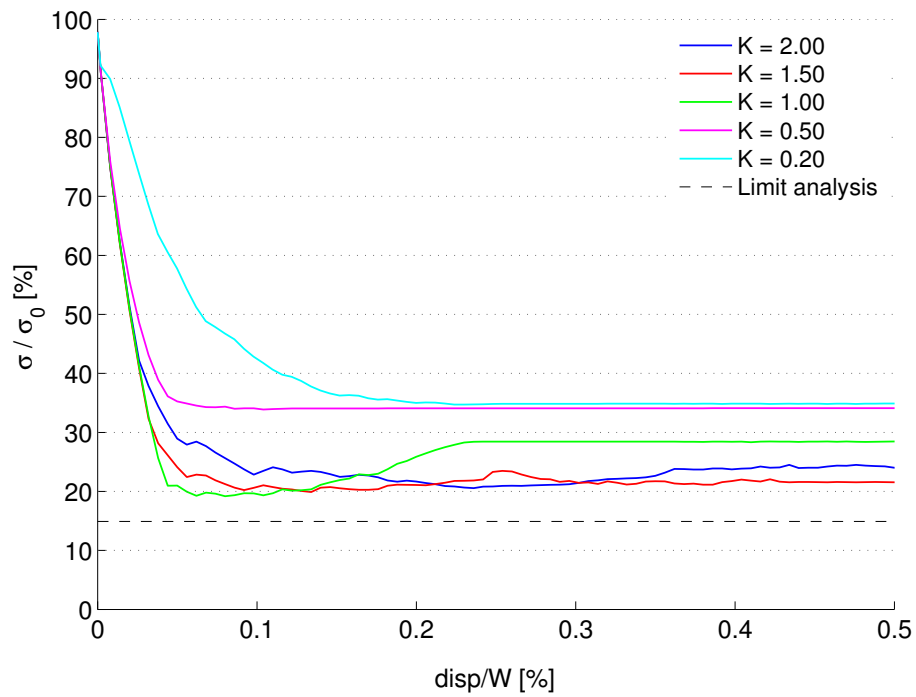


Figura 6. Curvas presión-desplazamiento para modelos con dilatación nula.

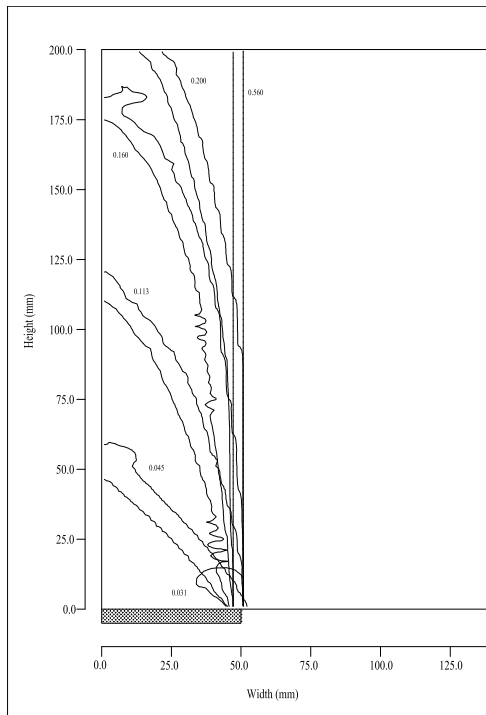


Figura 7. Evolución de la rotura para K igual a 1.0 y dilatación nula.

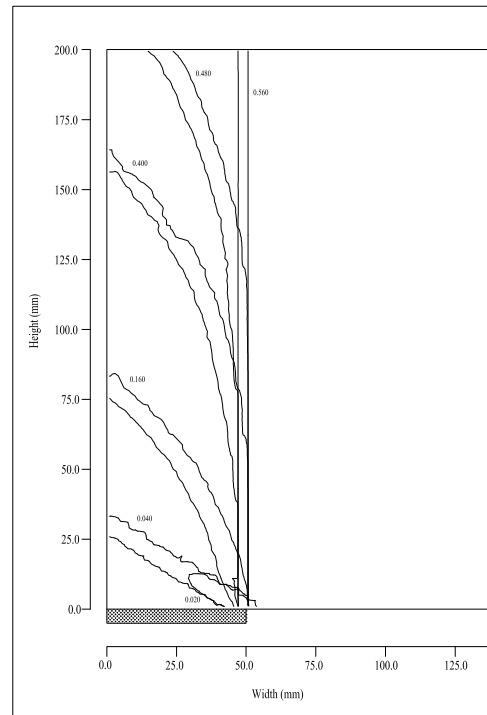


Figura 8. Evolución de la rotura para K igual a 2.0 y dilatación nula.

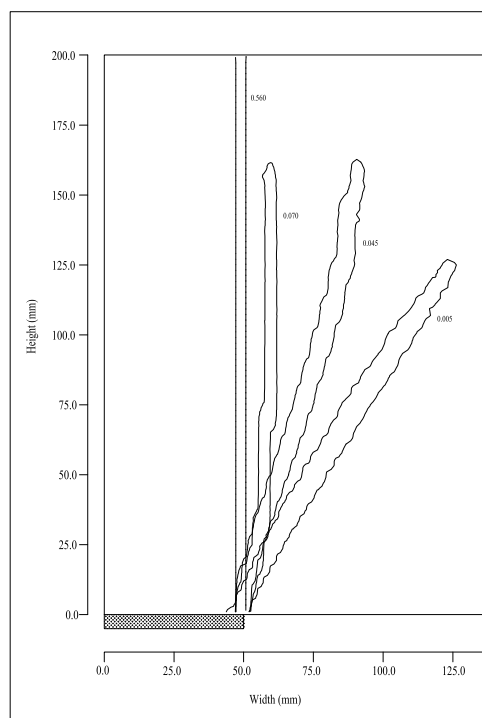


Figura 9. Evolución de la rotura para K igual a 0.20 y dilatación nula.